含微细颗粒混合气体竖直槽道内冷凝换热特性实验研究

管城熠 [1,2] **贾 力** [1,2*]

1 北京交通大学机械与电子控制工程学院热能工程研究所，北京 100044

2 微细尺度流动与相变传热北京市重点实验室，北京 100044

摘 要：用氮气、水蒸气和褐煤煤粉模拟褐煤烟气混合气体，在水蒸气质量分数为 30%，褐煤煤粉颗粒粒径小于 70um，颗粒浓度为 0.13-1.37 g/m³，混合气体雷诺数为 24331 的参数范围下，对含微细颗粒混合气体在竖直槽道内的冷凝换热特性进行实验研究，分析微细颗粒浓度和粒径对混合气体冷凝换热特性的影响。研究结果表明：颗粒在冷凝液膜内伴随冷凝液的流动而运动，换热最终达到稳定状态；随着混合气体中颗粒粒径和颗粒浓度的增大，混合气体显热换热强度减弱。

关键词：褐煤；冷凝换热；微细颗粒

中图分类号：TK123 **文献标识码：**A

The Investigation on Condensation Characteristics of Gas/Steam Mixtures with the Fine Particles in a Vertical Channel

GUAN Cheng-Yi[1,2] JIA Li[1,2*]

(1. Institute of Thermal Engineering, School of Mechanical, Electronic, and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. Beijing Key Laboratory of Flow and Heat Transfer of Phase Changing in Micro and Small Scale, Beijing 100044, China)

Abstract: The condensation heat transfer performance of mixed gas contained subparticles in vertical channel was investigated, and the effect of concentration and diameter of subparticles on the condensation heat transfer performance was analyzed under the condition of that mass of concentration of vapor was set to be 30%, diameter of lignite coals' particle was smaller than 70 μm, concentration of subparticle was 0.13-1.37 g/m^3, and Reynolds number of mixed gas was 24331. Nitrogen, vapor and lignite coal were chosen to simulate the lignite coal mixed gas. Results show that subparticles move with condensate flowing in condensate film, and finally the heat transfer gets to the steady state. With concentration and diameter of mixed gas's particles getting larger, the sensible heat transfer of mixed gas gets smaller.

Key words: lignite coal; condensation heat transfer; fine particle

0 引言

我国褐煤资源较多，普遍集中于缺水地区，褐煤烟气余热量高且水分含量较大，因此清洁高效地对褐煤制粉混合气和烟气进行能量回收和水回收成为了人们关注的焦点[1]。褐煤制粉混合气与烟气中含有一定浓度的煤粉微细颗粒，研究微细颗粒对能量回收及水回收的影响，具有重要意义。

学者们已经对竖管内含不凝气体的混合气体冷凝换热特性进行了大量研究[2-7]，Lee and Kim[8]实

基金项目：本文得到科技部“863”课题资助项目（No.2006AA05Z228）

验对比了槽道内带不凝气体的混合气与纯蒸汽的冷凝换热系数，发现由于不凝气体的存在对冷凝换热系数产生了很大的影响。贾力、鲁国丽[9]对水蒸汽质量含量在 8%-28%的混合气体在竖管内冷凝换热特性开展了研究，发现当在雷诺数为 3000-7000 时，壁面温度越低，液膜越厚，冷凝液量越大，并且液膜厚度随着雷诺数的增大也增大。齐巍等[10]实验研究了含有大量不凝性气体冷凝换热过程中的影响因素，研究认为冷却水管壁面温度增加对潜热换热起到了抑制作用。

公开的文献中关于颗粒对凝结换热影响的研究较少[10]-[12]。高翔[13]在颗粒运动强化气壁对流传热的机理研究中提出了颗粒碰撞壁面过程中颗粒打破边界层的强化传热模型，通过模型计算了风速、颗粒浓度和粒径等因素对边界层的扰动和对传热的影响。张义[14]用数值模型方法对竖直管内颗粒对边界层的扰动和对管壁磨损的研究中中得出结论，在一定颗粒直径范围内颗粒直径增大时，扰动作用减弱，切应力几乎不变。

本文以竖直槽道内含微细颗粒混合气体冷凝换热特性为研究目的，重点探索颗粒浓度和颗粒粒径对冷凝换热的影响。

1 实验系统

实验研究中采用氮气、水蒸气和褐煤煤粉配比混合气体模拟褐煤制粉混合气和烟气，控制煤粉浓度和煤粉颗粒大小进行实验，实验系统如图 1 所示。

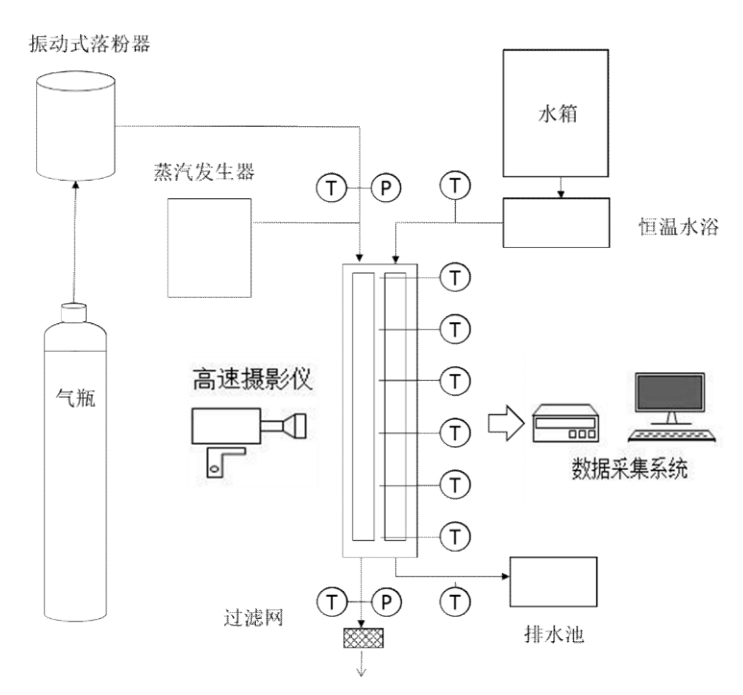


图 1　实验系统示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

实验系统由混合气制备系统、冷却水系统、实验段及数据采集系统组成。混合气体制备过程由罐装气瓶供应氮气，通过针阀与流量计联动控制氮气流量，控制振动式落粉器的震动频率控制落粉量，改变蒸汽发生器的输入电压，以控制蒸汽发生器的加热功率，得到一定流量的水蒸气，其与来流氮气充分掺混制备形成混合气体送入实验段。实验段采用三片铝版组合结构，中间铝板镂空混合气体和冷却水流动区域，由两侧铝板压合成封闭槽道，两侧铝板开玻璃视窗，可观测混合气体槽道内流动及冷凝情况，混合气体流通槽道尺寸为 10mm×10mm×300mm。实验段及混合气制备系统由保温材料包裹，减少外部环境和实验段的热量交换。实验段如图 2 所示。

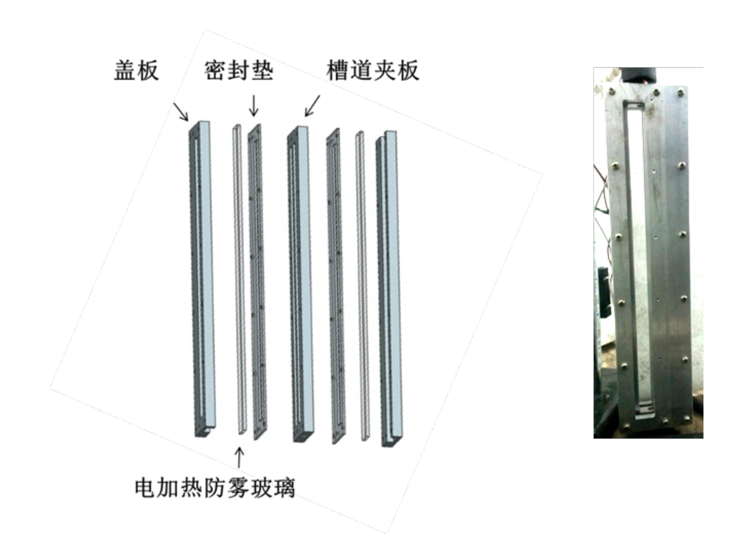


图 2　实验段示意图

Fig. 2 Schematic of test section

在冷却水进出口处布置温度计，冷却水由水箱提供，经过恒温水浴加热后，实现冷却水进出口处的温度控制和监测。混合气体自上而下流过混合气体槽道，在冷凝壁面发生凝结，冷凝液由壁面流下，经过过滤网实现冷凝液、蒸汽和微细颗粒的分离，收集冷凝液量，并用电子天平称重。冷凝壁面自上而下以 60mm 为间隔均匀布置 6 个温度测点，混合气体进出口布置 2 个温度测点和压力测点，温度采用热电偶采集，热电偶用补偿导线接触，终端与其终端与数据采集系统相连，热电偶的电压信号通过采集板进入计算机，由计算机进行数据采集存储并进行相关处理。

2 实验结果与分析

2. 1 粒径颗粒对混合气体冷凝换热特性的影响

冷凝壁面温度随时间的变化曲线如图 3 所示。实验过程中水蒸气质量分数为 30%，混合气颗粒浓度为 5g/m^3，混合气体雷诺数为 24331，混合气体入口温度为 98℃，混合气体入口压力为 101330pa，冷却水进口温度为 30℃，冷却水流量为 8.16g/s 时。实验段中部的测温点的温度在实验开始后 100s 内随着实验的进行而逐渐升高，而后达到稳定，冷凝液膜向下流动，吸附并带动微细颗粒流动，在冷凝壁面没有发生持续的颗粒沉积，颗粒沉积污垢热阻达到定值。

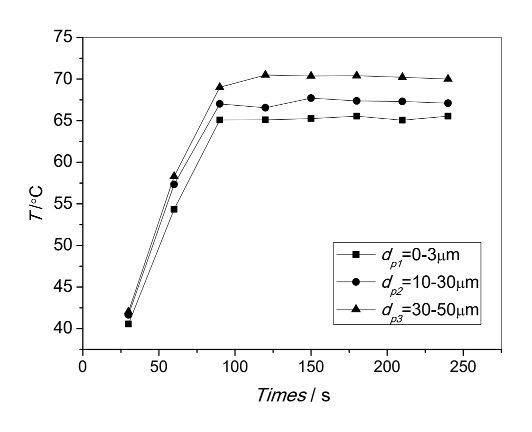


图 3 冷凝壁面温度随时间的变化情况

Fig.3 Condensing wall temperature changes with time

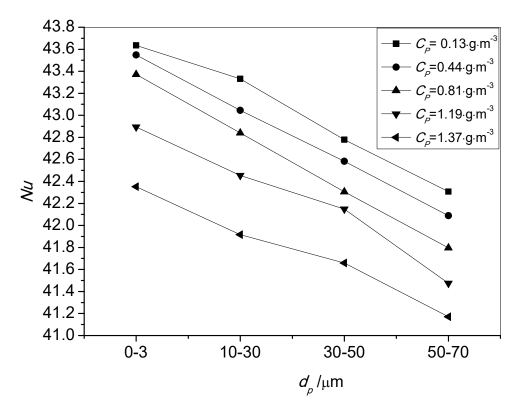


图 4 Nu 数随颗粒粒径变化

Fig.4　Nu changes with particle size

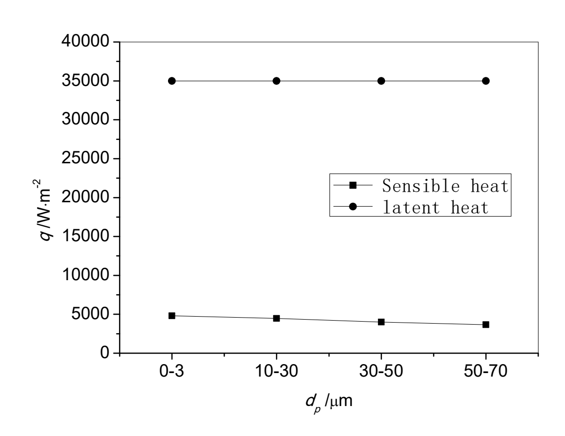


图 5 热流密度随颗粒粒径的变化

Fig.5 Heat flux changes with particle size

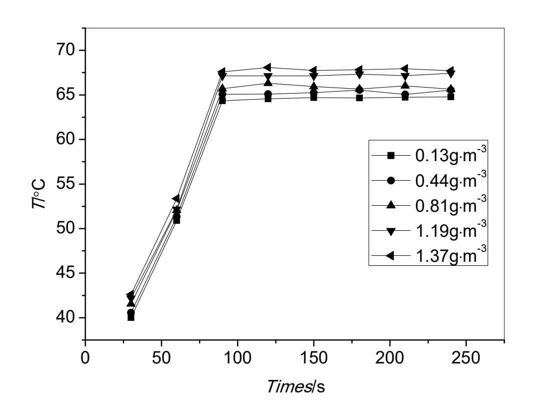


图 6 不同浓度情况下冷凝壁面温度随时间的变化

Fig.6 Condensing wall temperature changes with time under different particle Concentration

如图 4 所示，含有不同粒径颗粒的混合气体的凝结换热系数随着混合气体中颗粒粒径的增大而降低。由图 5 可知，当颗粒浓度为 0.44 g/m^3 时，潜热放热量基本保持不变，显热放热量随着颗粒粒径的增大而降低。颗粒在混合气体槽道内的运动主要由惯性力支配，颗粒在气膜内运动时，随着颗粒粒径的增大，颗粒随气膜运动的跟随特性减弱，一方面颗粒在气液界面附近被波动的液膜吸附的概率降低，另一方面，由于颗粒的存在，阻碍气膜波动的作用增强，致使显热换热量降低。主流气体中的蒸汽以扩散方式通过不凝气体层，而气膜的波动对水蒸气分子扩散影响较弱，气膜的波动对气膜两侧蒸汽分压力差影响较弱，致使增大混合气体中的颗粒粒径，潜热放热量保持不变。

2. 2 颗粒浓度对混合气体冷凝换热特性的影响

图 6 所示的实验条件为水蒸气质量分数为 30%，颗粒粒径为 0-3um，混合气体雷诺数为 24331，混合气体入口温度为 98℃，混合气体入口压力为 101330pa，冷却水进口温度为 30℃，冷却水流量为 8.16g/s。在实验开始时，实验段中部的测温处的温度随着实验的进行而逐渐升高，100s 后达到稳定。在冷凝液膜内，凝结液向下流动，吸附并带动微细颗粒流动，换热热阻保持不变，可知在冷凝壁面没有产生大量的颗粒沉积。

换热系数随着颗粒浓度的增大而降低，如图 7 所示，可知混合气体侧的热阻随着颗粒浓度的增大而增大。当混合气体颗粒粒径为 0-3um 时，换热情况的改变主要由显热放热量随着混合气体中颗粒浓度的增大而降低引起，如图 8 可知。在气液界面，由于气膜热阻层气体的纵向剪切力作用，液膜波动吸附微细颗粒进入液膜内，增大混合气体中颗粒浓度，液膜内吸附的颗粒量增大，增大了液膜热阻。剩余在气膜热阻层的颗粒量随着混合气入口颗粒浓度的增大而增大，降低了气相热阻。综合两部分作用，增大了混合气体侧的导热热阻而未改变蒸汽传质的驱动势。

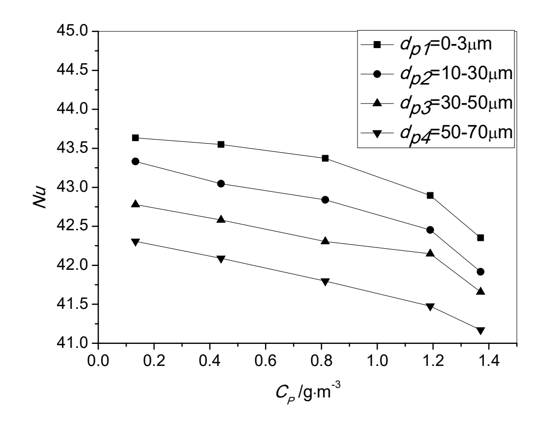


图 7 Nu 数随颗粒浓度变化

Fig.7 Nu changes with particle Concentration

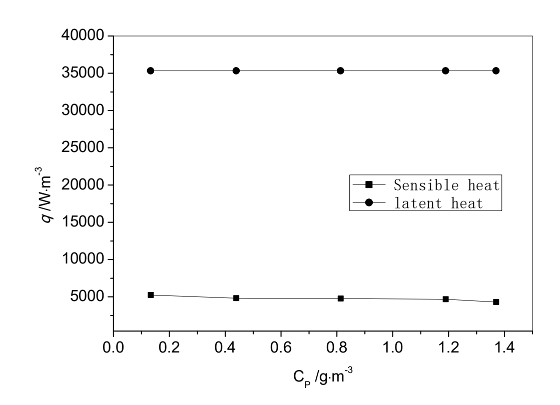


图 8 热流密度随煤粉颗粒浓度的变化

Fig.8 Heat flux changes with particle Concentration

3 结论

通过对含微细颗粒混合气体在竖直槽道内的冷凝换热情况进行实验研究，考察了不同颗粒浓度和颗粒粒径的工况，本研究得到主要结论如下：

（1）在水蒸气质量分数为 30%，褐煤煤粉颗粒粒径小于 70um，颗粒浓度为 0.13-1.37 g•/m^3，混合气体雷诺数为 24331，冷却水进口温度为 30℃情况下，颗粒在冷凝液膜内伴随冷凝液的流动而运动，换热最终达到稳定状态;

（2）增大煤粉颗粒粒径，颗粒随气相气膜运动的跟随特性减弱，阻碍气膜波动的作用增强，致使显热换热量降低;

（3）增大混合气体中颗粒浓度，改变了混合气体的气膜和液膜热阻，致使显热换热量降低，但变化程度不明显。

参 考 文 献

[1] 马有福,郭晓克,肖峰等.基于炉烟干燥及水回收风扇磨仓储式制粉系统的高效褐煤发电技术[J], 中国电机工程学报,2013,33(5):13-20.

Mao Y F, Guo X K, Xiao F, et al. Efficient Lignite-fired Power Generation Technology Based on Open Pulverizing Systems with Flue Gas Drying Fan Mill and Recovery of Heat and Water From Pulverizing Exhaust[J], Proceeding of the CEED,2013,33(5):13-20.

[2] Tong Z.M., Xu B, Li S.J, et al. Experimental Study of Condensation of Multicomponent Vapors inside Vertical Tubes[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Techonology, 2005, 27(2):120-123.

[3] Zhang J X. Vapor Diffusion Flow and Condensation Heat Transfer with High Partial Pressure Non Condensation Gases in Tubes[D]. University of Science and Technology in Beijing, Doctor, 2011.

[4] 贾力，孙金栋，李孝萍．湿烟气冷凝换热研究[J]．北京建筑工程学院学报, 2011,17(2):15-19.

Jia L, Sun J D Li X P. ，The Research on Condensing Heat Transfer of Wet Flue Gas[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture. 2011,17(2):15-19.

[5] Rao V D, Krihna V M, Sharma K V, et al. Convective Condensation of Vapor in the Presence of a Non-condensable Gas of High Concentration in Laminar Flow in a Vertical Pipe[J].International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(25-26):1-12.

[6] Zhu A M, Wang S C, Wang Z, Liu Q L. Mathematical Simulation of Steam Condensation with High Fractional Noncondensable Gas in the Dewvaporation Desalination Process[J]. Desalination, 2009, 243(1-3):145-158.

[7] Oh S, Shripad T R, Experimental and Theoretical Investigation of Film Condensation with Noncondensable Gas[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(15-16):2523-2534.

[8] Lee K Y, Kim M H. Experimental and Empirical Study of Steam Condensation Heat Transfer with a Non Condensable Gas in a Small-diameter Vertical Tube[J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238(1):207-216.

[9] 贾力，鲁国丽．竖直管内混合气体的凝结换热与 SO2 传递机理的理论研究[J]．工程热物理学报, 2003, 24(6): 1010-1012.

Jia L, Lu G L. The Research on Condensation of Vapor of Wet Flue Gas and SO_2 Absorption in Vertical Tube [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(6): 1010-1012.

[10] Bi H T, Ellis N, Abba I A, et al. A State of Theart Review of Gas–solid Turbulent Fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(21): 4789-4825.

[11] 史月涛，韩志航，孙奉仲等．螺旋翅片管防磨和防积灰特性的试验研究[J]．动力工程, 2006, 26(1): 146-148.

Shi M Y, Han Z H, Sun F Z, et al. Experimental Study on Anti-abrasion and Anti-ash-deposition Property of Spirally Finned Tubes[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(1): 146-148.

[12] 吕萍，王鹏．不同粒径飞灰对顺列管束磨损的非线性特性研究[J]．太原理工大学报, 2011, 42(4): 420-423.

Ping L, Wang P. Non-liner Characteristics Study on Wear of In-line Bundle by Fly-ash with Different Diameters[J].Journal of Taiyuan University of Technology, 2011, 42(4): 420-423.

[13] 高翔,骆仲泱,周劲松等. 气固两相流中颗粒运动强化器壁对流传热的机理[J].化工学报,1998,49(3):294-302.

Gao X, Luo Zhongyang, Zhou jinsong, et al.Mechanics of Enhancement of Convenctive Heat Transfer Due to Particle Impact in Gas-solid Two-phase Flow[J].Journal of Chemical Industry and Engineering,1998,49(3):294-302.

[14] 张义,周文,孙志强等. 管道内气固两相流冲刷磨损特性数值模拟[J].金属材料与冶金工程,2011,39(1):11-15.

Zhang Y, Zhou W, Sun Z Q, et al. Numerical Simulation of Scouring Erosion Characteristics for Gas-solid Two-phase Flow in Pipes[J].Metal Materials and Metallurgy Engineering,2011,39(1):11-15.